中国生态农业学报 2017 年 8 月 第 25 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2017, 25(8): 1216−1223

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170118

刘焕军, 孟令华, 邱政超, 张新乐, 殷继先, 徐梦园, 于微, 谢雅慧. 棉花生长初期灌溉信息遥感提取与校正[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1216−1223
Liu H J, Meng L H, Qiu Z C, Zhang X L, Yin J X, Xu M Y, Yu W, Xie Y H. Using remote sensing to extract and correct irrigation data during early cotton growth stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1216−1223

棉花生长初期灌溉信息遥感提取与校正*

刘焕军, 孟令华, 邱政超, 张新乐**, 殷继先, 徐梦园, 于 微, 谢雅慧
(东北农业大学资源与环境学院 哈尔滨 150030)

摘 要: 为提高生长初期低覆盖度作物长势的遥感监测精度, 需要消除灌溉引起的土壤水分背景变化对归一化差值植被指数(NDVI)的影响。为了实现棉花生长初期灌溉信息提取与校正, 提高棉花作物长势监测与产量预判精度, 本文以美国加利福尼亚州 San Joaquin Valley 的 2 个棉花地块为研究区, 选取棉花生长初期灌溉过程中的遥感影像, 构建两种灌溉信息提取方法(分阶段阈值法和灌溉线提取法), 确定最优灌溉像元提取方法; 比较分析灌溉与未灌溉情况下棉花的 NDVI 与归一化差值水分指数(NDWI)以及土壤调节植被指数的关系, 提取含有灌溉信息的像元, 并对 NDVI 进行校正, 消除灌溉对 NDVI 的影响。研究结果表明: 在棉花生长初期, 灌溉与未灌溉像元 NDVI 变化率达 12%, 差异较显著; 灌溉与否的棉花 NDVI 与 NDWI 间均存在极显著的线性关系, 决定系数在 0.80 以上; 利用灌溉线方法提取灌溉信息与分阶段阈值相比精度更高, 精度达 88%以上; 校正后线性回归模型精度达 0.95, 灌溉校正效果明显, 灌溉与未灌溉像元的 NDVI 差异减小至 2%。本研究通过对含有灌溉信息像元 NDVI 值的校正, 去除灌溉对 NDVI 造成的影响, 反映了真实的植被信息, 可实现对作物生长初期长势的准确遥感监测, 为遥感定量监测提供便利。

关键词: 棉花; 生长初期; 灌溉信息; 植被指数; 归一化差值植被指数(NDVI); 归一化差值水分指数(NDWI)
中图分类号: TP79; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)08-1216-08

Using remote sensing to extract and correct irrigation data during early cotton growth stage*

LIU Huanjun, MENG Linghua, QIU Zhengchao, ZHANG Xinle**, YIN Jixian, XU Mengyuan, YU Wei, XIE Yahui
(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Vegetation index is affected by background soil, especially in the early stage of crop growth. When vegetation cover is low, the effect of background soil is very obvious. In order to improve the precision of remote sensing (RS) monitoring on crop growth in the early growth stage, it is necessary to eliminate the effect of background soil moisture due to irrigation on normalized difference vegetation index (NDVI). Agricultural irrigation districts have failed to develop an effective method to eliminate difference in NDVI change, which has in turn hindered efforts to limit the effect of irrigation on NDVI. Thus, in order to increase the accuracy of RS monitoring of crop growth at early stage, this study explored the effects of difference in soil moisture information between irrigated and non-irrigated cotton field on NDVI. Two cotton plots in San Joaquin Valley in California (US) were selected as the research area. Day

* 黑龙江省自然科学基金项目(D201404)和黑龙江省普通高等学校新世纪优秀人才培养计划项目资助
** 通讯作者: 张新乐, 主要研究方向为生态遥感。E-mail: zhangxinle@gmail.com
刘焕军, 主要研究方向为农业遥感。E-mail: huanjunliu@yeah.net
收稿日期: 2017-02-13 接受日期: 2017-03-30
* This study was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (D201404) and the Program for New Century Excellent Talents in Heilongjiang Provincial University, China.
** Corresponding author, E-mail: zhangxinle@gmail.com
Received Feb. 13, 2017; accepted Mar. 30, 2017

of Year (DOY) 174 was determined as the critical phase at early growth stage of cotton for the extract of irrigation data through band reflectance, NDVI analysis of cotton field for 2002. Based on RS images, NDVI, normalized difference water index (NDWI), soil adjusted vegetation index (SAVI) and modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) of irrigated and non-irrigated pixels were calculated. Also the relationships between NDWI and different vegetation indexes (VIs) were analyzed, and the two methods [the standard deviation of the NDWI method (STD_{WI}) and irrigation line extraction method (based on relationship between NDVI and NDWI of irrigation and non-irrigation pixels, IR_L)] were used to extract the irrigation data. Then the accuracies of different methods were compared to determine the optimum extraction method of irrigation information. The IR_L method was next used to extract irrigation data and correct the NDVI of irrigation pixels in the early stage of cotton to improve monitoring accuracy of cotton growth. The results showed that difference in NDVI between irrigation and non-irrigation pixels was as high as 12% in the early growth of cotton. There was an extremely significant linear correlation between NDVI and NDWI of both irrigation and non-irrigation pixels, with coefficients of determination greater than 0.80. Compared with STD_{WI} method, IR_L method had a higher accuracy and with a precision greater than 88%. Through IR_L model correction, the accuracy of irrigation linear regression model was as high as 0.95. With this, correction effect of irrigation was obvious and the difference in NDVI between irrigated and non-irrigated pixels dropped to 2%. Thus in this study, NDVI with irrigation data was corrected, the effect of irrigation on NDVI eliminated while the effect of background soil moisture reduced. Finally, the study reflected the true vegetation data, obtained accurate remote sensing monitoring of cotton growth at the early growth stage and provided convenient monitoring method of crop growth via remote sensing. Moreover, it promoted accurate irrigation towards saving water resources.

Keywords: Cotton; Early growth stage; Irrigation data; Vegetation index; Normalized difference vegetation index (NDVI); Normalized difference water index (NDWI)

遥感技术具有宏观、客观、快速、低成本等特点，成为近几十年作物估产和长势监测的新兴技术[1-2]。及时准确地监测作物生长初期植被长势，可以对作物产量信息进行预判[3-4]。目前，在农业遥感监测中，植被指数(VI)应用广泛[5-6]，国内外用于长势监测的植被指数有多种，其中归一化差分植被指数(NDVI)使用最为广泛。裴志远等[7]利用同一生长季不同生育期及不同生长季同一生育期的NDVI值，构建不同的NDVI时间序列曲线的特征参数，建立了作物长势监测模型；黄青等[8]利用MODIS_NDVI分析确定了冬小麦(*Triticum aestivum* L.)信息提取的NDVI阈值，建立了冬小麦面积提取模型，得到2011年冬小麦整个生育期长势情况。

然而，由于研究区的气候、水文条件不同，土壤背景会存在差异。植被指数会受到农田土壤背景影响[9-10]，尤其是在作物生长初期，植被覆盖度较低，土壤背景的影响更加明显。土壤背景对植被造成的影响与作物对地覆盖度——叶面积指数(LAI)关系密切，覆盖度越大，土壤背景影响越小。因此在研究土壤背景对NDVI的影响时，不能忽略作物对覆盖度的影响。刘明等[11]根据NDVI对叶面积指数进行反演，验证NDVI与LAI之间存在显著相关性。作物生长初期覆盖度较低，NDVI值小于0.5，土壤背景影响较明显，需要消除土壤背景对NDVI的影响[12]。

Rondeaux等[13]从NDVI出发，对比了土壤调节植被指数等多种植被指数消除土壤背景影响的能力，指出在不同环境条件下，不同植被指数消除土壤背景影响的能力不同。然而土壤调节系列的植被指数应用虽广泛，物理意义明确；但由于土壤调节参数确定存在一定的困难，不能完全消除土壤等背景干扰。对于灌溉农业区，在整个作物生育期进行灌溉处理，导致作物生长期内灌溉与未灌溉区域遥感影像呈现不同特征，造成NDVI值的显著差异[14]。因为灌溉造成土壤水分信息分布不均匀，土壤水分差异会造成土壤背景亮暗的程度不同，对于相同的冠层结构，暗土壤背景的冠层NDVI值大于亮土壤背景的冠层NDVI值。目前，针对水分遥感监测更为直接的指标是归一化差值水分指数(NDWI)。很多学者利用NDWI进行水分以及土壤水分信息的提取。程晓娟等[15]指出，利用改进NDWI监测作物水分含量，对于评估作物水分盈亏平衡、指导农业生产灌溉具有重要意义；Lu等[16]也通过HJ-1A/B影像提取NDWI，对植被含水量信息进行分析，精度较高。然而目前研究只是针对土壤水分进行提取以及对作物水分含量进行监控，对灌溉农业区的作物长势监测少有提出有效消除NDVI差异变化的方法，没有从根本上解决灌溉对于NDVI造成影响的问题。

为提高生长初期作物长势遥感监测的精度，深入研究灌溉与未灌溉情况下土壤背景水分信息差异对NDVI 的影响，本文以棉花(*Gossypium* sp.)为研究对象进行如下研究: 1)为消除灌溉对土壤背景的影响，分析棉花生长初期灌溉与正常状态下的各种植被指数的差异; 2)利用 Landsat 30 m 空间分辨率遥感影像，获取NDVI 及反映土壤背景的植被指数时间序列，进行定

量分析，明确表征灌溉后土壤背景水分状况的植被指数; 3)确定灌溉信息提取方法以及 NDVI 的校正方法。本文研究结果对于低覆盖度下的 NDVI 应用具有一定参考价值，有利于促进生长初期作物长势精准监测，为遥感定量化与精准农业发展奠定基础。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

图 1 为研究区位置及影像图。本文研究区的两个地块种植的农作物均为棉花，位于美国加利福尼亚州南部的 San Joaquin Valley 西侧(图 1a)，属河流三角洲地区，土壤为棕壤土，整个农场面积约为 7 000 hm^2，每个地块面积约为 60 hm^2(图 1b)。该区属于地中海气候，夏季炎热干燥，冬季湿润凉爽。雨季主要集中在 11 月至次年 4 月，但降雨量极少，年平均降水量约 70 mm。光热资源丰富，最高温度达 40 ℃以上，蒸发量大，昼夜温差在 16 ℃左右，有利于棉花的生长，是棉花的高产区[17]。研究区农场在棉花整个生长期实施灌溉，在灌溉初期为喷灌，此后每 2~3 周进行沟灌。图 1c 与图 1d 为 A 地块 2002 年第 174 d 与 190 d 假彩色影像，图 1e 为 B 地块 174 d 假彩色影像。图 1c/e 可以看出地块的灌溉方式是从左至右、从上至下灌溉，灌溉与否差异十分明显；从图 1d 的第 190 d 影像看出，地块无明显灌溉差异，但该地块在相同区域，174 d 时存在灌溉差异明显界线。选择 190 d 是因为此时研究区棉花地块灌溉比较均一，与 174 d 形成对比。174 d 与 190 d 相差 16 d，由于本文选择的遥感影像是 Landsat_TM_5 和 Landsat_ETM_7 两种影像构成的时间序列，时间分辨率为 16 d。

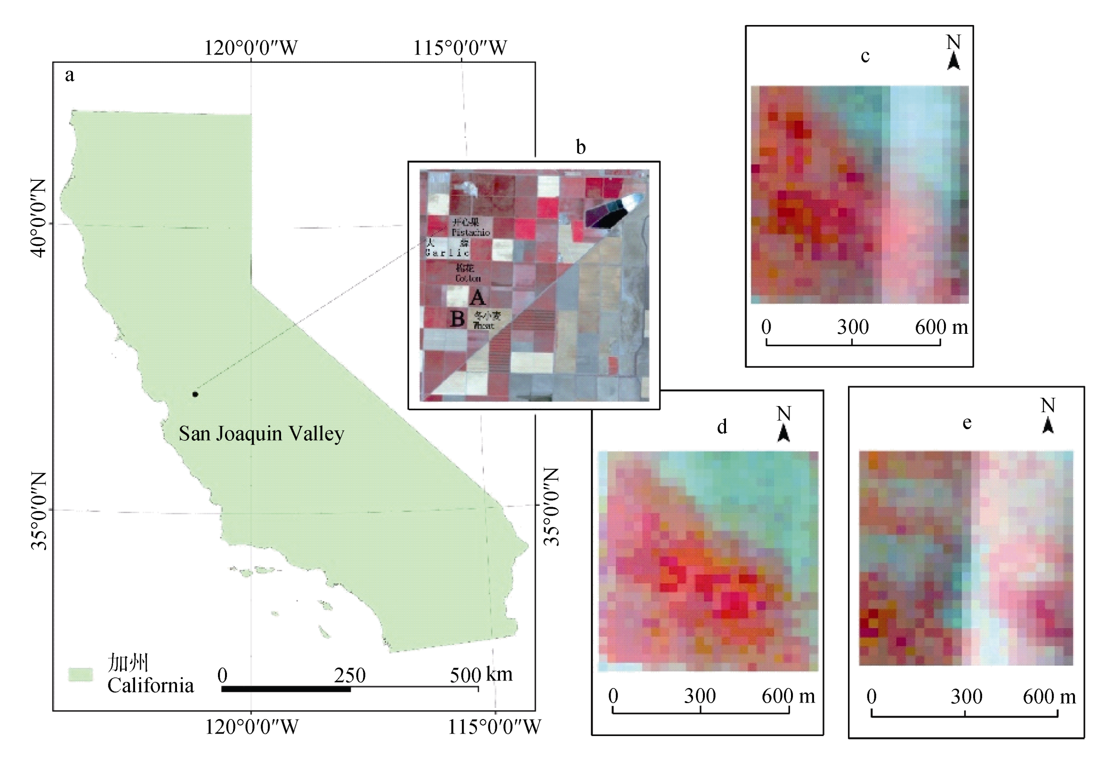


图 1 研究区位置及影像图(a: 加州; **b: San Joaquin Valley** 农场; **c: A** 地块 **174 d** 假彩色影像; **d: A** 地块 **190 d** 假彩色影像; **e: B** 地块 **174 d** 假彩色影像)

Fig. 1 Maps of the location and images of the study area (a: California map; b: San Joaquin Valley Farm map; c: false color image of plot A on DOY 174; d: false color image of plot A on DOY 190; e: false color image of plot B on DOY 174)

1.2 影像获取与预处理

本研究主要研究棉花灌溉时期遥感影像，根据美国棉花生长期的特点，下载研究区 2002 年棉花裸土期与生长期的 Landsat_5_TM 和 Landsat_7_ETM 的时间序列遥感影像，时间分辨率为 16 d，空间分辨率为 30 m。对影像数据通过 ENVI5.1 进行辐射定标、大气校正，并按照研究区范围矢量图进行裁剪。

1.3 植被指数选取与计算

NDVI 是植被长势监测应用最广泛的植被指数。土壤调节植被指数(SAVI)是 NDVI 的一个改进，能减小土壤等背景信息，增加植被信号。调整型土壤调节植被指数(MSAVI)是众多土壤调节植被指数中最简单的，避免了土壤线和土壤调节参数的获取。NDWI 利用近红外与中红外进行波段运算，用于研究植被的含水量[18]，本文选取 NDWI 对灌溉信息进

行研究。各植被指数计算公式如下：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{RED}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{RED}} \tag{1}$$

$$\mathrm{SAVI}=\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{RED}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{RED}+L}(1+L) \tag{2}$$

$$\mathrm{MSAVI}=\frac{2\mathrm{NIR}+1-\sqrt{(2\mathrm{NIR}+1)^2-8(\mathrm{NIR}-\mathrm{RED})}}{2} \tag{3}$$

$$\mathrm{NDWI}=\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{SWIR}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{SWIR}} \tag{4}$$

式中：RED、NIR、SWIR 为红波段、近红外、短波红外反射率。L 为土壤调节参数，描述了土壤反射特性，当植被覆盖度较低时，推荐 L 值为 1.0；当植被覆盖率中等时，推荐 L 值为 0.5；当植被覆盖度较高时，推荐 L 值为 0.25。

1.4　棉花灌溉信息研究时相的选取

大田作物冠层光谱反射率以及土壤背景对其造成的影响程度与作物覆盖度(叶面积指数)大小相关。覆盖度越大，土壤背景影响越小。本研究主要研究作物生长期的灌溉影像，通过时间序列曲线的特征参数得知(图 2a)，棉花从 174 d NDVI 上升速率增加，NDVI 值低于 0.5，由 NDVI 与叶面积指数的相关性得知 174 d 植被覆盖度并不是很高，特选取 174 d(2002 年 6 月 23 日)为研究灌溉信息关键时期，既考虑到作物对地覆盖度的影响，也充分显现出土壤背景对 NDVI 的影响。

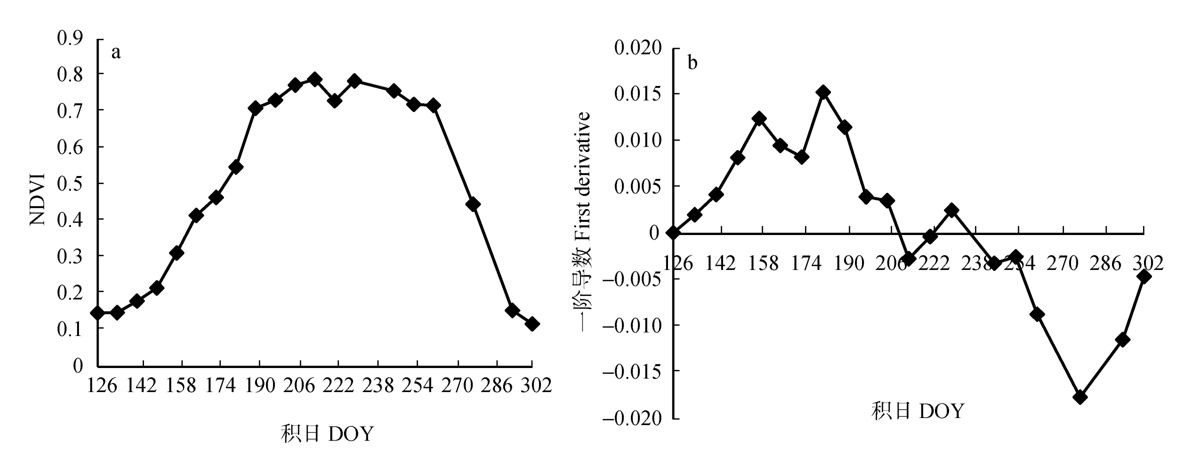


图 2　棉花生长期 NDVI 时间序列曲线(a)及 NDVI 一阶导数曲线(b)

Fig. 2　NDVI time series curve (a) and NDVI first derivative curve (b) during cotton growing period

1.5　灌溉像元提取及校正方法

1.5.1　标准差方法

标准差能反映一个数据集的离散程度，未灌溉水平下的标准差反映了正常状态下作物 NDWI 的离散程度，本文选取未灌溉像元 NDWI 的标准偏差($\mathrm{STDEV_{NDWI}}$)作为分阶段阈值进行灌溉信息提取，依照公式 $d_{\mathrm{NDWI}}=\frac{\mathrm{STDEV_{NDWI}}}{2}$，分别根据 NDWI+ d_{NDWI} 进行分梯度 NDVI 灌溉信息提取，简称为 $\mathrm{STD_{WI}}$ 方法。

1.5.2　灌溉线法

采用灌溉线进行灌溉像元提取，简称为 IR_L 方法。由 NDVI 与 NDWI 之间的散点图(图 3)可以发现，灌溉与未灌溉的散点图之间存在明显的分界线，本文将其定义为灌溉线。在覆盖度逐渐增加时，即 NDVI 增大，未灌溉像元的趋势线与灌溉像元的趋势线之间的距离会逐渐变小，灌溉线方程的斜率采用灌溉趋势线与未灌溉趋势线的平均值，截距采用两条直线的截距的平均值，可以在一定程度上降低高植被覆盖度下土壤背景信息弱化的影响。

$$\mathrm{NDVI}=\frac{K_{\mathrm{ir}}+K_{\mathrm{nir}}}{2}\times\mathrm{NDWI}+\frac{b_{\mathrm{ir}}+b_{\mathrm{nir}}}{2} \tag{5}$$

式中：K_{ir}、K_{nir} 分别为灌溉、未灌溉状态下的 NDVI 与 NDWI 线性模型的斜率，b_{ir}、b_{nir} 为灌溉像元、未灌溉像元散点图的所在直线截距。

1.5.3　灌溉校正方法

本文的目的是消除灌溉对 NDVI 的影响，将灌溉像元的 NDVI 调整到未灌溉状态的 NDVI，使灌溉前后植被指数具有可比性。因此，根据调整原理提出校正方法，分别以灌溉与未灌溉各像元趋势线的斜率与截距为参数进行校正，简称为 IR_L 方法。

$$\mathrm{NDVI_{IR_L}}=\frac{K_{\mathrm{nir}}}{K_{\mathrm{ir}}}\times\mathrm{NDVI_{IR}}+(b_{\mathrm{ir}}-b_{\mathrm{nir}}) \tag{6}$$

式中：$\mathrm{NDVI_{IR_L}}$ 为调整后的未灌溉棉花 NDVI，$\mathrm{NDVI_{IR}}$ 为灌溉后的 NDVI，K_{ir}、K_{nir} 分别为灌溉、未灌溉状态下的 NDVI 与 NDWI 线性模型的斜率，b_{ir}、b_{nir} 为灌溉像元、未灌溉像元线性模型的截距。

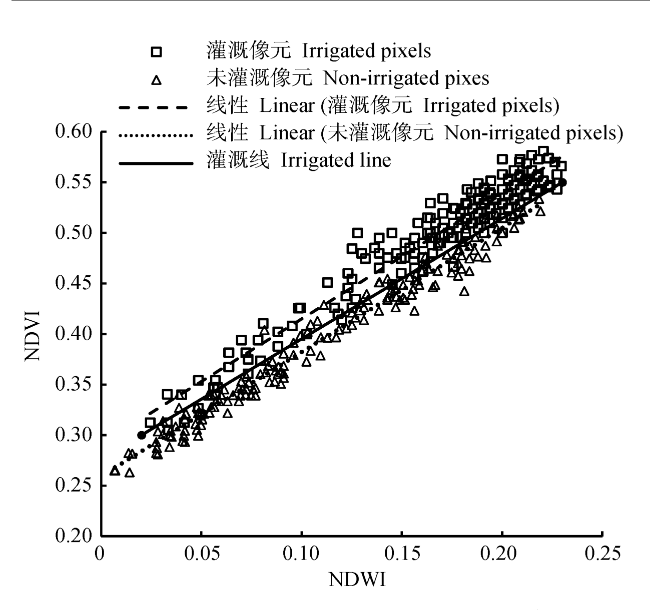


图 3 基于 **NDVI** 与 **NDWI** 线性关系的灌溉线确定方法
Fig. 3 Method of irrigation line determination based on linear relationship between NDVI and NDWI
NDWI: 归一化差值水分指数 Normalized difference water index.

1.5.4 精度验证

灌溉像元提取精度(α)采用下式计算:

$$\alpha = (1 - \frac{N_C}{N_t}) \times 100\% \tag{7}$$

式中: N_t 为真实灌溉像元数; N_c 为试验中提取灌溉像元时, 错误分到未灌溉像元这一类的数量错分数。

NDVI 校正精度验证, 采取 A 地块试验, B 地块进行验证的原则, 通过校正精度α进行判定, 且对比 NDVI 校正后散点图离散程度。

2 结果与分析

2.1 裸土期与生长期灌溉与否像元的差异比较分析

图 4a 和图 4b 分别显示了裸土期(2002 年 5 月 30 日)和棉田生长期长势中等像元棉花灌溉与未灌溉各波段反射率差异图, 图 4c 为灌溉与未灌溉像元 4 种植被指数的变化差异图(2002 年 6 月 23 日)。从图 4a 可以看出, 裸土时期各波段反射率差异较大, 说明灌溉会造成土壤背景发生显著变化; 从图 4b 可以看出, 生长期中等长势像元的灌溉与未灌溉像元各波段反射率变化仍较显著, 说明灌溉对第 174 d 冠层棉花反射率依然存在影响, 造成各波段反射率明显变化。从 4 种 VI 散点图可以看出(图 4c), 4 种 VI 灌溉像元均高于未灌溉像元, NDWI 变化极小, 而 NDVI 变化较大, 约为 12%, 其他 3 种土壤调节植被指数变化较 NDVI 更大, 没有从根本上剔除土壤背景的影响, 不能真实反映植被的真实长势。

2.2 棉花灌溉与未灌溉像元 **NDWI-VI** 线性回归关系分析

根据灌溉与未灌溉像元的 4 种 VI 散点图(图 4c)发现 NDWI 变化差异极小, 说明灌溉对其造成影响很小。因此本文拟以 NDWI 为自变量对其与 3 种 VI 的定量关系进行研究分析(图 5)。从图 5a、5b 可以发现, 灌溉与否 NDVI 与 MSAVI 值发生变化, 即灌溉棉花像元 NDVI 与 MSAVI 值明显高于未灌溉像元, 差异在 10%以上。且从图 5 可以发现灌溉与否棉花地块的 NDWI 与 3 种 VI 均存在极显著的线性关系。以此进行线性回归分析, 线性回归模型如表 1。A、B 两个地块 3 种 VI 与 NDWI 均是极显著相关, A 的决定系数更高, 在 0.93 以上, B 的决定系数为 0.90。由此可以看出, 灌溉会引起植被指数变化, 且变化差异较大, 最高达 12.26%。因此, 在农作物遥感长势精准监测中, 保证 NDVI 值实时监测的准确性极为重要。

2.3 基于 **STD_{WI}** 方法和 **IR_L** 方法的棉花像元灌溉提取及精度评价

本文对研究区种植棉花的 A 地块进行灌溉像元提取, 分别依据 IR_L(灌溉线法)和 STD_{WI}(标准差方法)两种方法, 提取精度见表 2。IR_L 方法精度可达 94.72%, 相比 STD_{WI} 方法, 更适用于灌溉信息提取。

本文选择利用 A 地块试验, B 地块验证的精度验证方法。再次选取 IR_L 方法对 B 地块进行验证, 根据结果发现, 本文提出的 IR_L 灌溉提取方法对 B 地块依然适用, 精度高达 88.41%。

2.4 作物生长初期棉花灌溉信息遥感校正

图 6 为 A 地块经过灌溉校正方法调整后的 NDWI 与 NDVI 的散点图, 与未消除灌溉影响的 NDWI-NDVI 散点图(图 5a)相比较, 利用 IR_L 方法校正后的 NDVI 明显差异减小。且经过校正后, NDVI 差异由灌溉前的 12%减小至 2%, 整个地块散点趋势趋于一致。

3 讨论

农作物长势监测主要是为田间管理提供及时准确的作物生长信息, 并为早期估产提供依据[19]。作物长势遥感监测充分体现了遥感技术全面、及时、经济的特点。近十几年, 许多研究利用高时空分辨率的遥感数据可以迅速获取大范围的作物长势信息。但现实情况下, 由于受大气和土壤背景的影响, 传感器只收到来自目标的部分信号, 同时收到部分噪音, NDVI 也由此受到影响, 且覆盖度越低, 土壤

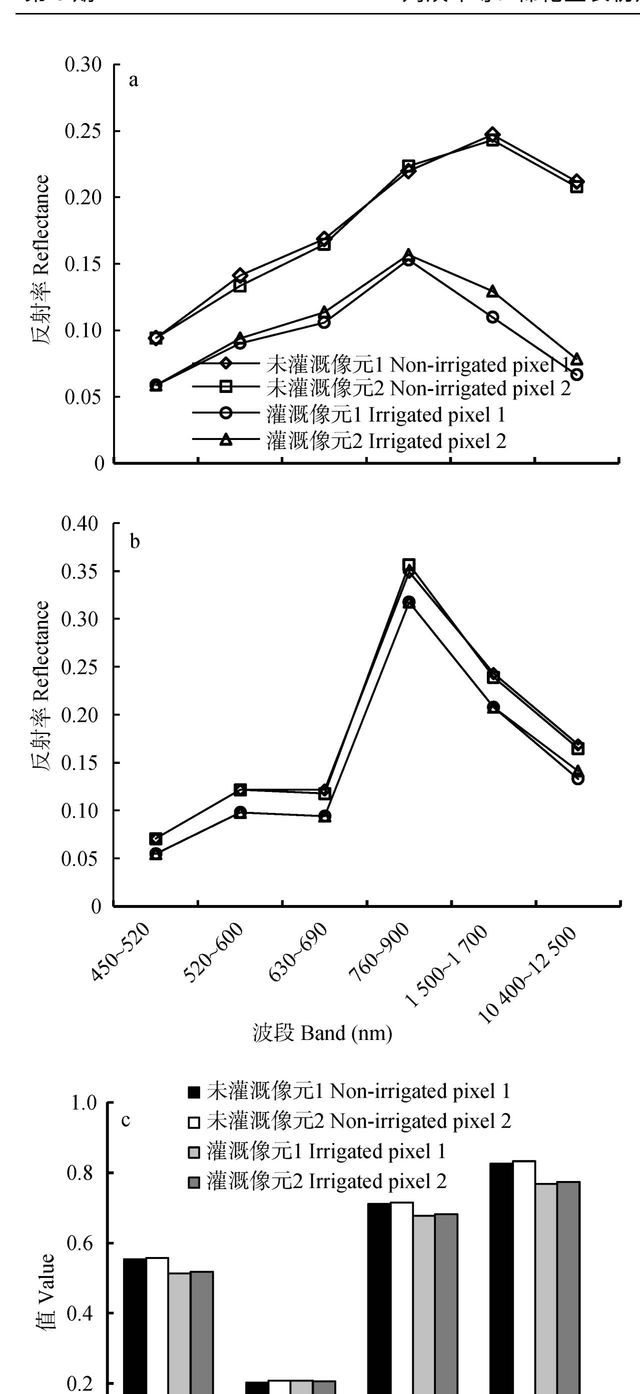


图 4　棉田灌溉与未灌溉像元的反射率差异图

Fig. 4　Reflectance differences between irrigated and non-irrigated pixels of cotton field

a：裸土期灌溉与未灌溉像元各波段反射率差异；b：生长初期(积日 174 d)灌溉与未灌溉像元各波段反射率差异图；c：生长初期(积日 174 d)灌溉与未灌溉像元的 4 种植被指数的散点图。NDWI：归一化差值水分指数；MSAVI：调整型土壤调节植被指数；SAVI：土壤调节植被指数。a: band reflectance of irrigated pixel and non-irrigated pixel during bare soil period; b: band reflectance of irrigated pixel and non-irrigated pixel at early growing period (DOY 174); c: four vegetation indexes of irrigated pixel and non-irrigated pixel at early growing period (DOY 174). NDWI: normalized difference water index; MSAVI: modified soil adjusted vegetation index; SAVI: soil adjusted vegetation index.

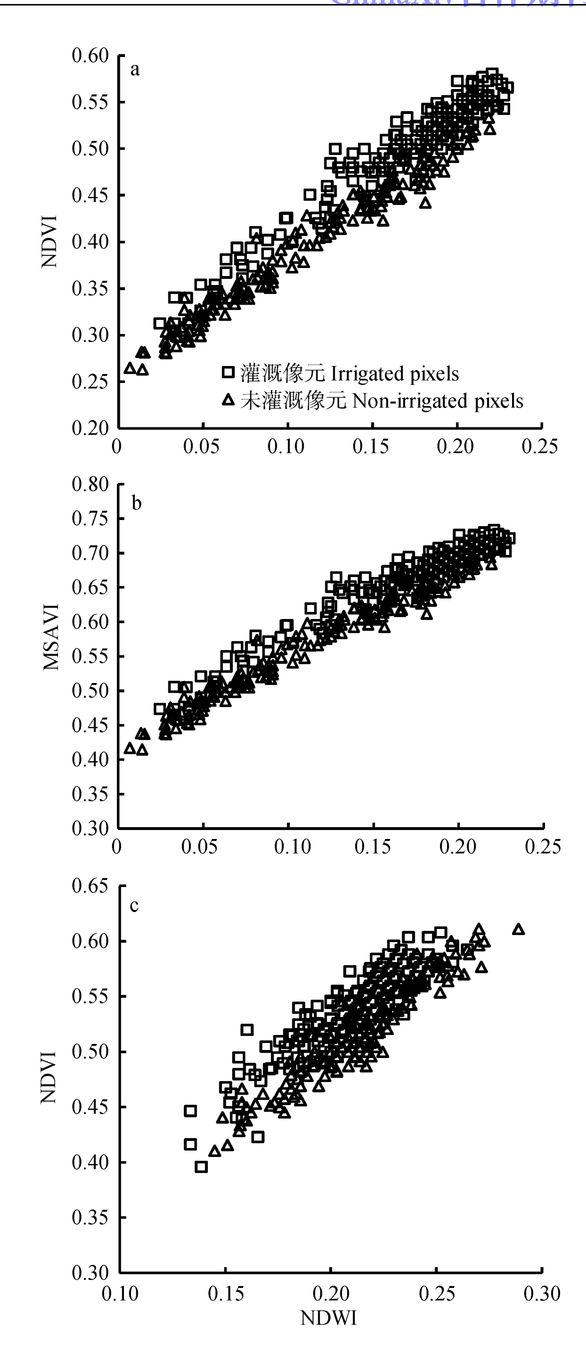


图 5　棉花生长初期(积日 174 d)不同植被指数与 NDWI 的二维散点图

Fig. 5　Two dimensional scatter diagrams of different vegetation indexes and NDWI in the early growth period of cotton (DOY 174 d)

a：A 地块 NDVI-NDWI；b：A 地块 MSAVI-NDWI；c：B 地块 NDVI-NDWI。NDWI：归一化差值水分指数；MSAVI：调整型土壤调节植被指数。a: NDVI-NDWI scatter diagram of plot A; b: plot MSAVI-NDWI scatter diagram of plot A; c: NDVI-NDWI scatter diagram of plot B. NDWI: normalized difference water index; MSAVI: modified soil adjusted vegetation index.

背景对 NDVI 的影响越大。本文选择积日 174 d 作为研究时相，NDVI 值小于 0.5，仍处于作物生长初期。由 NDVI 与 LAI 的相关性可知覆盖度较低时，土壤背景对 NDVI 影响较大，因此本文在作物生长初期对由于灌溉造成的土壤背景影响进行分析，对

表 1 灌溉与未灌溉像元的归一化差值水分指数(NDWI, *y*)与植被指数的线性回归模型

Table 1 Linear regression models of normalized difference water index (NDWI, *y*) and vegetation indexes for irrigated and non-irrigated pixels of cotton field plots

地块 Plot	自变量 Independent variable	线性模型 Linear model		植被指数变化率 Vegetation index change rate (%)	全部像元 All pixels	像元数 Pixels number
		灌溉 Irrigation	未灌溉 Non-irrigation			
A	NDVI	y=1.236 2NDVI+0.291 2 R^2=0.938 7	y=1.226 7NDVI+0.259 4 R^2=0.973 7	12.26	y=1.372 1NDVI+0.258 2 R^2=0.945 9	519
	SAVI	y=1.847 1SAVI+0.434 3 R^2=0.938 8	y=1.832 4SAVI+0.387 3 R^2=0.973 8	12.14	y=2.048 3SAVI+0.385 5 R^2=0.946 3	
	MSAVI	y=1.178 5MSAVI+0.463 7 R^2=0.936 2	y=1.263 3MSAVI+0.421 2 R^2=0.971 2	10.09	y=1.35MSAVI+0.425 3 R^2=0.948	
B	NDVI	y=1.353 8NDVI+0.254 6 R^2=0.829 3	y=1.403 2NDVI+0.216 3 R^2=0.889 2	17.71	y=1.370 8NDVI+0.238 4 R^2=0.753	506

SAVI: 土壤调节植被指数; MSAVI: 调整型土壤调节植被指数。SAVI: soil adjusted vegetation index; MSAVI: modified soil adjusted vegetation index.

表 2 基于灌溉提取方法的像元灌溉信息提取精度

Table 2 Extraction accuracy of pixel irrigation information based on irrigation extraction method of cotton field plots

方法 Method	地块 Plot	分阶段阈值 Stage threshold	灌溉线方程 Irrigation line equation	N_c	灌溉提取精度 Accuracy (%)	灌溉像元数 Number of irrigation pixels	总像元数 All pixels
STD_{WI}	A	0.029		48	85.09	322	519
	B	0.013		108	60.87	276	506
IR_L	A		y=1.231 5NDVI+0.275 3	17	94.72	322	519
	B		y=1.378 5NDVI+0.228 7	32	88.41	276	506

STD_{WI}: 标准差法; IR_L: 灌溉线法。STD_{WI}: standard deviation of NDWI (normalized difference water index) method; IR_L: irrigation line extraction method.

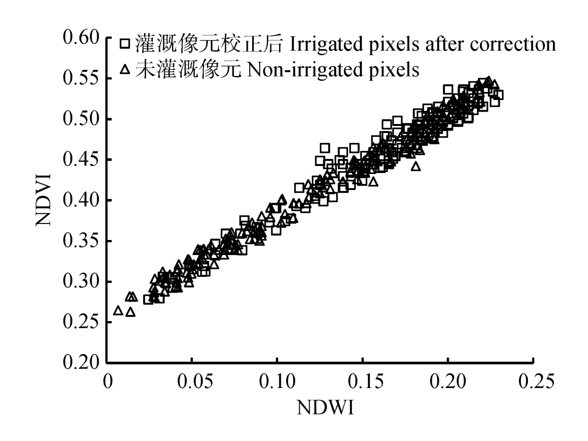


图 6 棉花 A 地块 NDVI 灌溉提取校正后散点图

Fig. 6 NDVI scatter of Plot A of cotton field after NDVI irrigation extraction and correction

NDWI: 归一化差值水分指数。NDWI: normalized difference water index.

NDVI 进行遥感提取与校正，这对作物长势监测有一定意义，同时有利于进一步实现精准灌溉。

本文对比 NDVI、NDWI、SAVI、MSAVI 4 种植被指数在灌溉前后各波段反射率的差异，结果显示 NDWI 在灌溉前后差异最小；且发现土壤调节植被指数系列并不能完全消除土壤背景的影响，尤其针对本文研究区的灌溉情况，土壤调节植被指数消除水分背景影响的效果并不好，与 NDVI 相比差异更大。土壤调节植被指数系列多数是以土壤线模型计算而形成的线性模型，但现实中土壤线难以获取。本文选取的土壤调节植被指数，SAVI 中土壤调节参数 L 的确定是一个难题，针对不同植被覆盖度，L 值的确定存在难度，植被覆盖度划分并不明显；MSAVI 模型中没有明确反映土壤背景的参数。然而，实际上的植被冠层光谱是一个组合，它是由几个复杂的光学物理过程组合而成，仅通过线性组合对其进行反演，存在一定的局限性。因此很难在实际应用中通过植被指数模型定量消除土壤背景的影响。本文利用变化差异最小的 NDWI 与 NDVI 的线性关系，对灌溉后的 NDVI 再次进行校正，一定程度上消除低覆盖度下土壤背景的影响，有效降低了由于灌溉引起的土壤背景水分信息的影响，为遥感定量监测提供了便利，可更加准确地对作物长势进行预判，推进精准灌溉，节约水资源，促进农业可持续发展。

4 结论

本文以美国加州棉花为研究对象，对研究区棉花生长初期灌溉与未灌溉像元的植被指数差异与各波段反射率差异进行分析，利用灌溉与未灌溉像元的 NDVI 与 NDWI 之间极显著的线性关系，构建两种灌溉提取方法，实现了快速准确地对生长初期棉花灌溉像元进行提取，且精度高达 88%。并利用灌溉线模型对含有生长初期棉花灌溉像元 NDVI 值进行校正，有效地去除了土壤水分对植被指数 NDVI 的影响。本文研究结果解决了灌溉造成 NDVI 值

高于正常水平的问题, 反映了植被的真实信息, 实现了对生长初期作物长势的准确遥感监测。本文研究成果将为低覆盖度下 NDVI 的研究应用提供参考依据, 也将会促进遥感定量监测与精准农业的发展。

参考文献 References

[1] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277–293
Zhao C J. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(12): 277–293

[2] Johnson D M. An assessment of pre-and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 141: 116–128

[3] Ren J Q, Chen Z X, Zhou Q B, et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 403–413

[4] Mkhabela M S, Bullock P, Raj S, et al. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(3): 385–393

[5] Wardlow B D, Egbert S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1096–1116

[6] Wu B F, Meng J H, Li Q Z, et al. Remote sensing-based global crop monitoring: Experiences with China's CropWatch system[J]. International Journal of Digital Earth, 2014, 7(2): 113–137

[7] 裴志远, 杨邦杰. 多时相归一化植被指数 NDVI 的时空特征提取与作物长势模型设计[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 20–22
Pei Z Y, Yang B J. Analysis of multi-temporal and multi-spatial character of NDVI and crop condition models development[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(5): 20–22

[8] 黄青, 唐华俊, 周清波, 等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 218–223
Huang Q, Tang H J, Zhou Q B, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 218–223

[9] Yao X, Ren H, Cao Z, et al. Detecting leaf nitrogen content in wheat with canopy hyperspectrum under different soil backgrounds[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 32: 114–124

[10] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247–260
Shi Z, Liang Z Z, Yang Y Y, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(2): 247–260

[11] 刘明, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 基于 MODIS-NDVI 的春玉米叶面积指数和地上生物量估算[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 80–87
Liu M, Feng R, Ji R P, et al. Estimation of leaf area index and aboveground biomass of spring maize by MODIS-NDVI[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(6): 80–87

[12] 唐怡, 刘良云, 黄文江, 等. 土壤背景对冠层 NDVI 的影响分析[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(2): 142–148
Tang Y, Liu L Y, Huang W J, et al. Analysis on the influence of soil backgrounds on canopy NDVI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(2): 142–148

[13] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95–107

[14] 曾红伟, 吴炳方, 邹文涛, 等. 灌溉区与雨养区作物长势差异比较分析——以美国内布拉斯加为例[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 560–567
Zeng H W, Wu B F, Zou W T, et al. Performance comparison of crop condition assessments in irrigated and rain-fed areas: A case study in Nebraska[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4): 560–567

[15] 程晓娟, 杨贵军, 徐新刚, 等. 新植被水分指数的冬小麦冠层水分遥感估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3391–3396
Cheng X J, Yang G J, Xu X G, et al. Estimating canopy water content in wheat based on new vegetation water index[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3391–3396

[16] Lu S L, Wu B F, Yan N N, et al. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 428–434

[17] 刘焕军, 孟令华, 张新乐, 等. 基于时间序列 Landsat 影像的棉花估产模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 215–220
Liu H J, Meng L H, Zhang X L, et al. Estimation model of cotton yield with time series Landsat images[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 215–220

[18] Gao B C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257–266

[19] Corbeels M, Chirat G, Messad S, et al. Performance and sensitivity of the DSSAT crop growth model in simulating maize yield under conservation agriculture[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 76: 41–53